

## 유무선 통신에서의 제어 이론 적용에 대한 연구 개관

### Survey on Applications of Control Theories to Wired and Wireless Communication

권 옥 현, 김 형 석

(Wook Hyun Kwon and Hyung Seok Kim)

**Abstract** · Wired and wireless communication technique is growing rapidly. As the number of communication users is larger, problems such as network congestion and signal interference between users are getting more important. There have been researches that try to solve them by control theoretic approaches. They apply various control theories to the control issues of communication. This paper surveys these researches and classifies them into ATM, TCP/IP, and wireless communication according to the target. The feedback control model of each communication protocol is shown and related researches are summarized and analyzed.

**Keywords** : communication, network, control theory, ATM, TCP/IP, wireless, congestion control, power control

#### 1. 서론

제어 이론은 단순한 수위, 온도 조절에서부터 복잡한 대상으로 인공위성, 미사일 등의 비행 물체 제어에 이르기까지 여러 부분에 고르게 적용되어 왔다. 또한, 온풍기 및 냉방기의 자동 온도 조절 기능, 콤팩트 디스크의 모터 제어 등 실생활에도 유용하게 사용되며, 석유, 화학 공장 등의 공정 제어에 응용되어 경제적이고, 고품질의 상품을 생산하는 데 기여하고 있다[1]. 이처럼 제어 이론의 적용 대상은 많은 부분에 걸쳐서 존재하며, 통신, 반도체 공정 등 첨단 산업에도 제어 이론이 적용되고 있다.

통신 기술은 날로 발전하여 전세계 어디에서도 정보를 빠르게 서로 교환할 수 있게 되었으며, 특히, 인터넷의 급속한 발전은 세계가 하나로 되는 구심점을 제공하였다. 또한, 최근에는 무선 통신 기술의 발달로 무선 인터넷의 태동과 발전을 지켜보게 되었다. 그러나, 통신망의 발전과 함께 멀티 미디어 데이터의 요구가 늘어나게 되고 사용자의 수가 늘어남에 따라 통신량의 폭증 현상은 지속되었으며, 이러한 현상은 통신망의 혼잡(congestion)을 더욱 가중시키게 되었다. 따라서, 이전부터 진행되어 오던 통신망에서의 혼잡 제어(congestion control) 연구 분야가 더욱 그 중요성을 가지게 되었다. 무선 통신의 경우에는 통신 사용자들의 수가 급증함에 따라 여러 사용자간의 신호 간섭 등으로 인한 용량(capacity)의 저하 문제가 발생하게 되었다. 따라서, 이를 해결하기 위하여 전력 제어(power control) 연구가 활발히 진행되어 왔다. 이러한 유무선 통신망에서 발생하는 중요한 두 가지 제어 문제에 있어 근래에 들어 체계적인 분석을 통한 제어 이론적 접근 시도들이 이루어지고 있다.

통신망의 특성상 한정된 자원을 공유해서 사용하나 이 자원을 증대하기에 많은 비용이 들기 때문에, 통신망 자원을 충분히 남긴 상태로 하여 사용하는 경우는 거의 없다. 즉, 통신망의 자원과 전송되어야 하는 트래픽의 사용량에

대한 불일치로 혼잡이 발생하는데 이를 해결하기 위하여 송신 노드의 데이터 전송을 제어하는 것이 혼잡 제어이다. 즉, 호스트, 라우터 등의 요소들에 대한 총체적인 고려를 하여 주어진 트래픽량을 손실 없이 통신망에서 전달할 수 있도록 하는 것을 의미한다. 혼잡 제어는 복수개의 통신 노드들 간의 자원 이용으로 인하여 발생하는 트래픽 제어를 가리키는 반면, 흐름 제어는 하나의 송신 노드와 하나의 수신 노드 사이에서 발생하는 점대점 트래픽과 관계가 있다. 즉, 수신 노드가 데이터를 처리하는 것보다 송신 노드가 더 빠르게 보낼 수 없도록 제어하는 것을 의미한다. 그러나, 혼잡 제어는 흐름 제어를 포함한 개념으로 볼 수 있고, 통신망의 부하 문제가 발생하였을 때, 다양한 방법에 의해서 송신 노드에게 메시지를 통해서 알리는 알고리즘을 가진다는 점에서 동일하여 서로 뚜렷한 구별 없이 사용되어 왔다[2]. 따라서, 본 논문에서도 이를 총칭하여 혼잡 제어라는 용어로 사용할 것이다.

혼잡 제어는 ATM(Asynchronous Transfer Mode), TCP/IP(Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 등의 대표적 유선 통신망 프로토콜을 대상으로 하고 있다. ATM의 여러 가지 서비스 중 혼잡 제어로 레이트 기반 제어(rate-based control)를 이용하는 가용 비트율(Available Bit Rate, 이하 ABR) 서비스의 트래픽을 중심으로 연구가 진행되어 왔으며, TCP/IP는 창 기반 제어(window-based control) 방식을 이용한다. 두 제어 방법들은 모두 귀환 제어를 이용하며 주로 큐(queue)를 모델링하여 제어한다. 일반적인 제어 대상인 모터 또는 온도 조절 시스템과 비교할 때 고려되어야 할 점들은 귀환 지연 시간이 매우 커질 수 있다는 것과 다양한 트래픽 패턴, 사용 가능한 대역폭의 변화, 채널 노이즈 등 불규칙적인 요소가 많이 존재한다는 것이다.

유선 통신뿐만 아니라, 최근에 급속히 발전하고 있는 무선 통신에서도 제어 이론이 적용되는 연구가 진행 중이다. 다중 경로 페이딩(multi-path fading), 섀도잉(shadowing), 근거리/원거리 영향(near/far effect)을 최소화하고 각 사용자들의 전력 레벨을 동일하게 하도록 하여

사용자간 간섭을 줄여 무선 통신망의 용량(capacity)을 크게 하기 위한 전력 제어(power control)이다[3]. 국내에서 사용되는 CDMA(Code Division Multiple Access) 방법처럼 가상 노이즈(pseudo-noise)를 발생시키는 확산 대역(spread-spectrum) 통신 방식을 이용할 때 이러한 제어 문제는 중요하다 또한, 이것은 전력 소모 문제와도 관련이 되어질 수 있다.

고전 제어 이론, 지능 제어, 강인 제어, 최적 제어, 예측 제어 등 여러 가지 제어 이론들이 유무선 통신망의 제어 문제에 적용되어 왔다. 현재까지 혼잡 제어, 그리고 무선 통신에서의 전력 제어 등 통신에서의 제어 방법은 대부분 통신 공학자들에 의해 분석되고 제안되었다. 기존 연구들을 살펴볼 때 표면적으로는 해석 방식에 있어 제어 이론이 그대로 적용되지 않은 것처럼 보이나 구체적인 이론의 바탕에는 고전 제어 또는 현대 제어 이론에서 제시된 이론들과 밀접히 연결되는 면들이 발견된다. 따라서, 통신망에서의 비선형성 모델의 선형화모델링과 안정도(stability) 분석 등 제어 이론을 고려한 체계적인 분석이 통신에서의 제어를 연구하고자 하는 제어 공학자들에게 요구된다

본 연구는 일반 유선 통신망의 대표적인 TCP/IP, ATM과 무선 통신에 이르기까지의 제어 문제와 모델링, 그리고 최근 연구 진행 현황을 요약 정리한다. 제2장에서는 고속 통신망으로 사용되는 ATM에서의 제어 문제에 대해 언급하고, 제어 모델을 제시한다. 또한 현재까지의 제어 이론적 적용과 관련하여 진행된 연구들에 대해 설명하고 구체적으로 비교, 분석해 본다. 제3장에서는 인터넷의 기본 프로토콜인 TCP/IP에서의 제어 이론의 적용에 대해 논의해 보기로 하겠다. 제4장에서는 현재 활발히 연구가 진행되고 있는 무선 통신에서 사용자 용량(capacity) 증가를 위한 전력 제어 문제에 대해 논의해 본다. 5장에서는 앞으로의 연구 방향들을 제시하며 결론을 맺기로 한다.

## II. ATM

ATM은 스위칭 방식의 통신 방법으로 통신망의 백본으로 현재 주로 이용되나 이더넷(Ethernet)을 기반으로 하는 TCP/IP의 대부분의 통신망 점유로 한때 그 인기가 누그러들었으나 최근에 다시 그 시장을 넓히고 있는 추세이다.

### 1. 제어 대상

ATM은 음성, 데이터, 비디오 등의 다양한 QoS(Quality of Service)를 요구하는 트래픽 전송을 지원하는 고속 통신망으로, 사용자가 QoS를 요구하는 것이 가능하다. 예를 들자면, 고속 데이터 트래픽은 패킷 손실에 민감하며, 실시간 비디오 트래픽은 시간 지연에 민감하게 작용한다. 즉, 통신망에서 다양한 QoS의 요구를 만족하기 위해서 트래픽 제어는 중요한 역할을 담당한다.

ATM 트래픽은 상수 비트율(Constant Bit Rate, CBR), 가변 비트율(Variable Bit Rate, VBR), 가용 비트율(Available Bit Rate, ABR), 불특정 비트율(Unspecified Bit Rate, UBR)의 네가지로 분류된다. CBR과 VBR은 버퍼 공간과 연결 용량을 충분히 예약해 놓은 상태로 전송된

다. 즉, 그 도착율은 보통 변화하는 네트워크 환경에 따라 적응되는 형태를 취하지 않는다. UBR은 대역폭의 예약이 없으며, 혼잡 발생 시 패킷을 잃도록 되어있다. ABR은 CBR, VBR이 서비스된 후 여분의 버퍼 공간과 링크 용량을 토대로 전송되기 때문에, 패킷의 도착율(arrival rate)은 통신망의 혼잡을 피하기 위해 일정하게 조정되어야 한다. ABR은 네트워크가 송신자에게 레이트 피드백(rate feedback)을 하는 ATM의 유일한 서비스이다. 송신 노드는 자원 관리(Resource Management, 이하 RM) 셀이라고 하는 특수한 셀들을 만들어 보내며, RM 셀들은 스위치에 의해 변형되어 혼잡 상태에 관한 정보를 송신 노드에게 되돌려 주고, 송신 노드들은 피드백 정보를 이용하여 송신율을 조절한다.

ATM에서 혼잡 제어를 하는 목적은 성능을 최대화하고, 스위치 내 버퍼 요구량을 최소화하며, 공정한 대역폭 할당을 하기 위함이다. ATM에서는 주로 레이트 기반 혼잡 제어 방식이 사용되며, 이 방식은 송신 노드에서 주기적으로 만들어내는 자원 관리(RM) 셀들이 스위치나 수신 노드를 거쳐 ABR 서비스 송신 노드로 통신망에 의해 혼잡 상태 정보를 피드백하여 알려주면, 송신 노드는 송신율(Transmission rate)을 조절한다.

### 2. 제어 모델

혼잡은 전송 경로를 따르는 중간 노드에서 송신 트래픽의 합이 미리 예정된 버퍼 용량을 초과하는 경우에 발생한다. ATM 고속 통신망에서 가상 회로(Virtual Circuit, 이하 VC)에서의 혼잡 제어는 그림 1에서 보여지는 것처럼 큐와 각종 통신 지연을 바탕으로 모델링된다. 다른 VC로부터의 데이터는 가용 서비스 능력의 방해로서 모델링된다. 제어되는 대상은 ABR 서비스 노드들의 송신율이며, 여러 송신 노드들이 제어기에서 계산된 제어값을 받아서, 송신율을 조절한다. 이렇게 함으로써 수신 버퍼의 데이터 저장량이 조절된다.

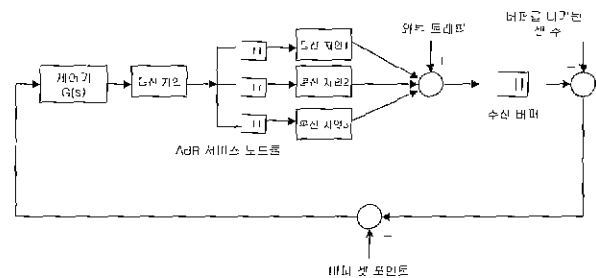


그림 1. ATM ABR 피드백 제어 모델.

Fig. 1 The feedback congestion control model of ATM ABR.

### 3. 연구 현황

[6]은 레이트 기반 귀환 제어 구조를 체계적으로 제어 이론에 기반하여 분석한 대표적인 연구이다. 이 연구에서는 PD(Proportional-Derivative) 귀환 제어를 이용한 제어기를 제시하고, 폴(pole) 위치에 의해 제어기 게인 등의 파라미터를 결정하였다. 병목 스위치 내에 위치한 제어기가

각 송신 노드에 적합한 송신율을 계산하여 각 송신 노드에 이 정보를 피드백한다. A.Kolarov는 PD 제어기를 두 개 사용한 이중 PD 제어기를 제안하였으며, 이것이 안정한 제어 방법임을 강조하였다[7][8].

비선형적인 제어 모델은 선형 모델로 바꾸어 선형 제어 이론을 적용하는 것이 분석에 용이하므로, ATM 혼잡 제어의 비선형성을 선형화하여 선형 제어 이론으로 접근을 시도하려는 연구들이 있다[21][22][23]. 혼잡 정보를 송신 노드에 알리는 방법으로, 한 비트를 피드백 데이터로 이용하는 이진 피드백과 스위치가 최대 가능 송신율을 각 송신 노드에게 피드백하는 명시적 전송을 피드백이 있다. [21]은 이중 ATM의 이진 피드백 알고리즘 혼잡 제어를 고전 제어 이론으로 분석하기 위하여 알고리즘의 비선형성을 선형화한 후 선형 제어 이론을 사용하여 분석하였으며, [22]에서는 ATM에서 많이 사용되는 명시적 전송을 피드백 알고리즘을 선형 제어 이론을 이용하여 분석하였다.

통신에서 중요한 사항인 피드백 지연 시간의 영향을 고려하지 않게 되면, 제어 응답이 진동하며 불안정해질 가능성이 있다. 따라서, [14]의 연구와 같이 혼잡 정보의 귀환 또는 제어 명령의 전송 등에 있어 통신 상의 전송 지연 시간 문제를 해결하기 위해 ATM 혼잡 제어에 예측 제어 기법을 도입하는 연구들이 최근에 이뤄지고 있다 [9][10][11][13][14]. [9]의 연구는 이전에 제시했던 TRAC (Threshold-based Algorithm for Control) 혼잡 제어에 예측 제어 기법을 도입하여 PATRAC(Predictive Agents in a TRAC)을 제시하였다. [10]은 단일 루프 제어 모델에서 발전한 멀티 루프 제어 모델을 다루었으며, 제어 모델에 전송 시간 지연의 영향을 포함하여 모델을 제시하였다. 일반 예측 제어 기법을 제어에 이용하여 최적의 성능을 내도록 하였으며, 혼잡이 발생하지 않도록 하면서 자원 사용을 최대화하는 데에 제어 목적을 두었다 [11]의 연구에서는 통신 지연 시간으로 인한 불안정성을 극복하고 패킷 손실을 피하기 위하여 비례(proportional) 제어기와 스미스 예측기(Smith's predictor)를 도입하였다. 혼잡 정보를 보낸 후 그 응답을 받는 시간을 가리키는 왕복 지연 시간(round trip delay)의 영향을 줄이고 버퍼에 대기 중인 셀들의 양에 의존하는 제어기를 만들고자 하였다. 즉, 경로를 따라 존재하는 중간 노드들의 VC 큐 길이에 따라 송신율이 조절되는 혼잡 제어 알고리즘이다. 이 연구에서는 스미스 예측기의 특성 상 왕복 지연 시간이 상수로 고정되어 미리 알려져 있다고 가정하였다. 이러한 문제를 극복하기 위하여, [26]은 왕복 지연 시간 고정에 대한 가정 없이 제어하는 기법을 제안하였다. 이 연구는 제어기를 두 개의 귀환 제어기로 분리하여 각자에 대한 관찰자(observer)를 두어 각자의 에러를 관찰하는 기법을 사용하였다. [13]에서도 미래의 큐 길이에 대한 예측 정보를 사용하며, 스미스 예측기를 제어기에 사용하였으며, 예측 제어기와 함께 왕복 지연 시간과 채널의 노이즈 등의 간섭 장해를 추정하기 위하여 퍼지 논리와 뉴럴 네트워크 추정기를 사용하였다.

제어 이론 중 또 다른 분야인 최적 제어 이론을 ATM

혼잡 제어에 적용하려는 시도를 보인 연구들이 있다 [15][16]. [15]의 연구는 최적 제어 이론을 사용하여 셀 손실, 버퍼 사용량, 대역폭 사용율, 사용자 요구량 등을 이용하여 혼잡 상태를 정량화하기 위한 성능 페러미터를 제시하였고, 이를 이용하여 혼잡 제어를 수행하였다. [16]에서는 제어 이득(control gain)은 LQ(Linear Quadratic) 추적기를 사용하여 조절된다. 다중 입력 노드로부터 나오는 제어 입력들에 적절히 가중치를 둔 총 합과 에러 에너지들의 최소값을 구하여 제어 모델의 파라미터들을 구하였다.

통신 모델의 안정도에 중점을 두는 강인 제어의 연구로 [20]의 연구에서는 제어기들이 각 송신 노드에 있다고 가정하고, 버퍼 점유에 대한 정보만 각 송신 노드들로 피드백하는 방법을 제안하였다. 제어기들이 시간에 따라 자주 변화하는 VC 수의 변화에 의존하지 않는다는 점에서 강인하다고 보았다. 기타 연구로, 지능 제어 이론인 퍼지 이론 등을 적용한 연구들이 존재하는데, 앞으로 이 제어 방법의 확장성을 기대해 볼 수 있다[24][25]

### III. 인터넷 프로토콜 (TCP/IP)

TCP/IP는 현대 인터넷의 기본 프로토콜로, TCP/IP의 혼잡 제어는 ATM의 혼잡 제어 방식과는 달리 창 기반 혼잡 제어 방식을 이용한다. TCP-tahoe, TCP-reno, TCP-vegas 등의 다른 종류의 TCP들이 현재 사용되며, 이들의 혼잡 제어 방식 또한 각각 다르다.

#### 1. 제어 대상

TCP/IP는 Jacobson[29][30]에 의해 1988년에 소개되었으며, 본래 제한된 범위의 전송율과 전송 지연을 가진 전형적인 통신망에서 신뢰성 있게 데이터 전달을 하기 위해 설계되었다. 현재는 인터넷의 기본 프로토콜이 되어 널리 사용된다. 최근에는 통신망이 집 앞 부근까지 광섬유가 들어오게 되면서 전송 에러로 인한 패킷의 손실은 거의 발생하지 않는다. 즉, 인터넷에서 발생하는 대부분의 전송 시간 초과와 혼잡으로 인한 패킷 손실에 의해 나타난다고 할 수 있다.

혼잡 제어는 데이터 전송율을 조절하는 것이기 때문에 전송층(transport layer)인 TCP에서 혼잡 제어를 주로 맡으며, TCP는 송신 노드들로 인해 통신망에 과부하를 걸리지 않게 하기 위해서 '혼잡 창(congestion window)' 라는 변수를 사용한다. 즉, TCP는 동작 중에 계속 혼잡 창의 크기를 변화시키면서 제어하는 창 기반 혼잡 제어 방식(window-based congestion control)을 이용한다. 이 방식은 창 크기를 증가시키면서 그 용량을 탐지해 보는 것으로, 패킷 손실 때 혼잡을 감지하고 창의 크기를 일정한 규칙에 의해 줄인다. 감소된 창 크기는 다시 패킷 손실이 발견될 때까지 계속 증가하게 된다. 이 때, 창 크기의 조절 방법에 따라 앞에서 언급한 TCP의 자기 다른 종류들이 존재한다. TCP의 혼잡 제어에서 패킷 손실에 대해서 송신 노드에 알려주는 역할은 수신 노드에 전적으로 달려 있으며, 중간 노드들은 송신 노드에 정보를 직접 주지 않는다. 그러나, ATM의 ABR 혼잡 제어에서는 중간 노드들이 데이터 레이트를 송신 노드에게 공급한다.

TCP는 ATM의 혼잡 제어와 달리 통신망에서 명시적 피드백(explicit feedback)을 가정하지 않으므로, 어떻게 혼잡 상태에 대한 정보를 줄 수 있는지가 문제가 된다. ACK(acknowledgement) 신호를 이용하여 패킷 손실이 일어나는 것을 감지하고 패킷 손실 전까지 송신율을 증가시킴에 의해 네트워크 용량을 알아내게 된다. TCP에 제어 이론을 대입하자면, 제어 모델은 이러한 면을 고려하여 수립되어야 한다.

2. 제어 모델

그림 2는 TCP의 내제적 피드백 제어 모델을 나타낸 것이다. TCP의 송신 노드는 ACK를 받는 상태 또는 시간 경과에 따라서 패킷의 손실 여부를 판단한다.

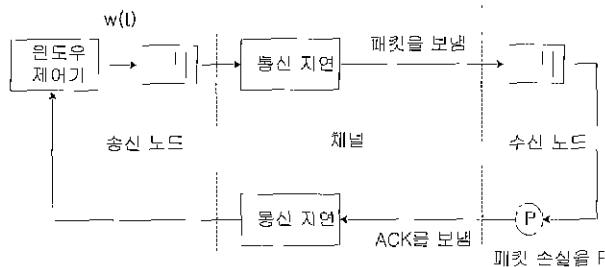


그림 2. TCP 피드백 제어 모델.  
Fig. 2. The feedback congestion control model of TCP.

패킷 손실율 P에 따라서, ACK 신호가 송신 노드로 보내지게 된다. 송신 노드는 ACK 신호의 전달 시간 및 수신 상태를 탐지하여 창 크기  $W(t)$ 를 제어하게 된다. 내제적 피드백 제어임을 알 수 있으며, 통신 지연은 양방향에 각각 존재한다. 이 두 시간 지연을 합한 값이 왕복 지연 시간(round trip delay)으로 혼잡 제어에 중요한 변수로서 작용한다.

3. 연구 현황

TCP/IP의 혼잡 제어는 ATM에 비해 제어 이론적인 분석에 대해 많은 연구가 이루어지지 않았다. 이는 ATM의 ABR 서비스의 명시적 피드백(explicit feedback)을 지원하지 않는 창 기반 혼잡 제어이기 때문이다. Van Jacobson의 논문들[29][30]에서 보여지는 TCP-Tahoe와 TCP-Reno의 혼잡 제어는 가장 널리 사용되는 혼잡 제어 방식이다. 그러나, 이에 제어 이론을 적용하여 안정도와 각종 제어 성능 등을 체계적으로 분석하고자 하는 연구가 이루어져 왔다. 최근에, S.Mascolo는 고속의 인터넷을 위한 TCP의 혼잡 제어 알고리즘으로 스미스 예측기를 이용하여 전달 지연 시간에 대한 고려를 한 예측 제어를 제시하였다[31][32].

되먹임 정보로서 패킷 손실을 이용하는 TCP-Reno와 TCP-Tahoe 등의 여러 TCP 종류들의 혼잡 제어 알고리즘은 서로 다르며 다른 버전의 TCP 혼잡 제어들을 성능 비교한 연구들도 있다. 최근에 TCP-vegas의 혼잡 회피 기법이 기존 방법에 비해 성능의 향상이 있다고 보고되며,

TCP-vegas의 혼잡 제어 알고리즘을 변형하고 수학 모델과 함께 제어 이론을 적용한 연구들이 최근에 행해져 왔다[33]-[35]. 이들은 안정성, 공정성 등에 대해 제어 공학의 관점에서 문제를 해결한다.

ATM 혼잡 제어의 연구가 활발하기 때문에, TCP의 혼잡 제어 알고리즘에 ATM에서 사용되는 레이트 기반 제어를 응용하려는 연구들도 수행되어 오고 있다.

IV. 무선 통신

1. 제어 대상

DS/CDMA 방식에서 모든 사용자들은 하나의 무선 채널을 공유하고 있으며 다중 접속은 각 사용자에게 다르게 주어지는 특정한 스프레드 스펙트럼(spread-spectrum) 가성노이즈(pseudo-noise) 코드를 이용하여 처리된다. CDMA 시스템에서 용량을 최대화하기 위해서는 각 단말기의 신호가 기지국에 최대의 신호대간섭비(SIR)를 가지고 수신되어야 한다. 시스템 용량, 즉, 영역 당 사용자의 수는 어떤 사용자가 수신하고자 하는 신호와 다른 사용자들의 신호 사이에 상호 관계에서 비롯되는 다중 접속으로 인한 간섭 현상에 크게 의존한다. 단말기의 송신 전력이 낮으면 통화 품질이 낮아지고, 높으면 그 단말기의 통화 품질은 좋아지나, 같은 채널을 사용하는 다른 단말기에 간섭을 크게 주어 다른 가입자의 통화품질이 나빠진다. 따라서, 모든 가입자가 양호한 통화품질을 유지하며 용량을 최대로 하기 위해서는 기지국에 수신되는 각 단말기의 수신 전력이 같고, 최대의 신호대간섭비를 가지도록 각각의 단말기 송신 전력을 제어하여야 한다.

실제로 다중 접속 간섭으로 인한 성능 하락은 세도잉, 이동 기기와 기지국 거리에 따라 기지국에 수신되는 신호 전력의 차가 큰 근거리/원거리 문제와 각 단말기별로 발생하는 다중 경로 페이딩에 의해 더 악화된다. 그러나, 다중 경로 현상과 무선 연결의 비동기 특성은 셀 방식 통신에서 필연적으로 일어나는 사항이다. 그러므로, 세도잉과 근거리/원거리 문제의 악영향을 누그러뜨리기 위해서 평균 수신 전력을 일정한 수준으로 유지하기 위해서 역방향 연결에서 정교한 전력 제어가 필요하다.

2. 제어 모델

그림 3은 역링크 전력 제어의 페루프 피드백 제어 모델이다. 무선 기기에서 기지국으로 보내지는 정보는 채널의 전송 지연을 받고, Rayleigh 페이딩과 각종 간섭 현상에 의해 피드백 정보에 노이즈가 부가된다. 기지국에 들어온 신호대잡음비등의 정보를 통하여 전력 레벨을 비슷한 수준으로 만들도록 기준 레벨(reference level)과의 차를 제어기의 입력으로 받게 된다. 이 때, 추정기를 기지국의 입력단에 달아서 받아진 정보의 미래값을 추정하거나 필터링하여 사용할 수도 있다. 제어기는 전력 제어를 위한 각종 제어 알고리즘을 가지고 있으며, 채널을 통하여 무선 기기로 정보를 보내서 무선기기의 전력을 조절한다. 일반적으로 무선 기기의 전력을 조절하기 위해 많은 비트수가 이용되지 않고, 단계별로 나누어 데이터량을 최소화한다.

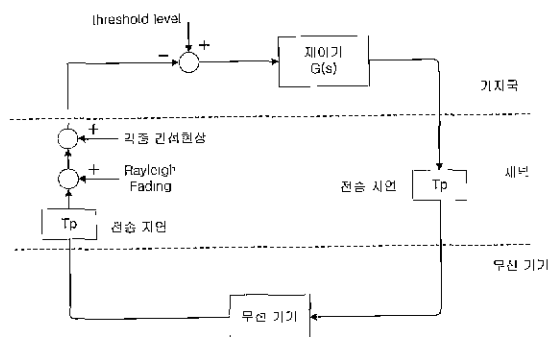


그림 3. CDMA의 피드백 혼잡 제어 모델.  
Fig. 3. The feedback congestion control model of CDMA.

3. 연구 현황

[3]에는 무선 통신 방식인 CDMA에 대한 개관과 함께, 전력 제어의 필요성에 대해서 설명되어진다. 이후로 전력 제어에 대한 연구가 더욱 활발해지게 되었으며, [37]의 논문에서는 피드백 속도가 향상된 전력 제어에 대해서 강조하였다. 다중 경로 페이딩 비율보다 더 짧은 주기로 전력 제어를 하게 될 때, 빠른 페이딩의 영향에 대처할 수 있다는 것을 강조하였다.

무선 통신에서는 특히 예측 제어 이론을 이용한 연구가 활발히 이루어져 왔다[40]-[43]. 무선 통신 상에도 유선 통신과 같이 피드백 통신 지연이 고려되어야 하며, 특히 무선 기기의 이동 속도가 빨라지게 되면 통신 속도가 저하되므로 미래값을 예측하여 제어하는 방법이 필요하다. 예측 제어를 하게 될 때에는 채널 상의 각종 노이즈 등에 대해 피드백되어 온 값을 추정하기 위하여 추정기 또는 필터 등을 이용하는 경우가 많다. [41]의 연구에서는 CDMA IS-95 표준을 변형하여 예측기에서 미래의 입력값을 예측하고 일단계 제어가 아닌 다단계 제어를 하는 방식을 제안하였다. [40]에서는 추정기를 이용하여 SIR(Signal to Interference Ratio)을 추정하고 추정된 값을 이용하여 다단계 예측 제어 방식을 시행하였다. 이 두 연구에서는 예측 제어 방식이 무선 기기의 이동 속도가 빠를수록 더 좋은 효과를 내게 되는 것을 보여 주었다. [42],[43]에서는 FIR 형태이며 저대역 통과 필터인 Heinonen-Neuvo 다항 예측기로 수신 신호 전력을 예측하는 방식을 전력 제어에 이용하였다.

지능 제어 중 퍼지 제어를 적용한 연구로 [45]가 있는데, 이 연구는 퍼지 PI 제어를 이용하였다. 이 제어 방식은 사용자 간의 간섭에 대해 강인한 제어 응답을 보이고, 파라미터의 값이 정확히 알려져 있지 않은 시간 지연이 존재할 때 기존의 고정 단계 전력 제어와 그 성능을 비교하여 짧은 상승 시간, 작은 오버슈트 시간, 더 적은 추적 에러 등이 획득되어 성능이 향상됨을 보였다. 유선 통신망과 마찬가지로 안정도 측면에 대한 연구도 진행되어 왔는데, [39]에서 안정도 분석을 위하여 고전 제어 방식인 루트 로커스(root locus) 분석 방법을 이용하였다

TDMA에서의 전력 제어에 대한 연구들도 있는데, [38]

의 연구에서는 TDMA에서 행해지는 전력 제어에 대해 소개하고, CDMA의 전력 제어와 여러 면에서 비교 분석하였다. TDMA에 예측 제어 이론을 적용한 연구로 [44]는 칼만 필터 추정기를 이용한 예측 제어를 이용한다. SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio)을 피드백 정보로 사용하는데, 이는 SIR과 구별없이 사용되는 것이 통례이다

현재 차세대 무선 휴대 통신으로 IMT-2000에 대한 개발과 표준화 작업이 이루어지고 있다 앞으로는 역방향 연결(reverse link)과 전방향 연결(forward link)에 전력 제어가 모두 도입되며, 그 제어 주기 또한 현재 사용되는 기존 CDMA 방식에서 1.25msec인데, 이에서 625usec로 줄어들 예정이다. 전력 제어는 무선 통신 사용자가 계속해서 늘어나고 있고 앞으로도 계속 늘어나리라 예상되므로, 끊임없이 연구되어야 할 가치있는 문제이다.

V. 결론

지금까지 유무선 통신에서의 각종 제어 문제들에 대해서 제어 이론을 적용하여 해결하려는 연구들에 대하여 서술하였다. ATM과 TCP에서의 제어 문제로서 혼잡 제어를 중심으로 언급하고, 피드백 제어 모델을 구성해 본 후, 진행되어온 여러 연구들을 제어 이론별로 분류하여 요약 정리하였다.

같은 제어 목적을 가지는 연구들이라도 통신 모델의 특성에 따라 다른 문제들로 분류될 수 있다. 혼잡 제어는 혼잡을 조절하려는 목적은 같으나, 노드의 갯수, 트래픽의 종류, 스위치의 기능, 망의 범위 등에 따라 문제와 문제 해결 방법은 여러 가지로 나타난다. 전력 제어도 마찬가지로 피드백 방향, 피드백 정보, 통신 프로토콜에 따라 다양한 문제로 나타나게 된다. 즉, 유무선 통신과 관련된 제어 문제는 다양하게 도출될 수 있으며, 통신 사용자 수의 급속적인 증가에 의해 제어 문제가 더 부각되기 때문에, 보다 나은 분석적인 모델과 해석이 필요하다.

ATM의 ABR 트래픽 혼잡 제어의 제어 이론 적용 연구가 가장 활발히 이루어져 왔으며 앞으로도 많은 연구가 이루어질 것이다. 그리고, 무선 통신의 전력 제어 문제에서도 제어 이론의 적용 연구가 활발하며, 성능 요구의 확장에 따라 체계적 분석이 더욱 필요하게 될 것이다. 또한, 본 논문에 나타난 연구들 이외에도 앞으로 통신의 성능을 향상시킬 수 있는 새로운 제어 문제를 찾을 수 있을 것이다. 제어 대상에 제어 이론을 적용할 때 가장 중요한 것은 제어 대상의 정확한 모델링이다. 따라서, 제어 대상이 통신이므로 통신 모델의 특성이 충분히 고려된 모델링과 이에 적합한 제어 이론을 적용한다면 실용적이고 가치 있는 연구가 될 것이다.

참고 문헌

[1] 권옥현, 이준화, "제어 이론 개요", 제어·자동화·시스템 공학회지, vol. 1, no. 2, pp 5-13, 1995. 09.  
[2] Andrew S. Tanenbaum, Computer networks, Prentice-hall, 1996

- [3] K. S. Gilhousen, I. M. Padovani, A. J. Viterbi, L. A. Weaver, and C. E. Wheatley, "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE trans. Veh. Technol.*, vol. 40, pp. 303-312, May, 1991.
- [4] E. Altman, T. Basar, Srikant R, "Congestion control as a stochastic control problem with action delays", *Automatica*, vol. 35, no. 12, pp. 1937-1950, 1999
- [5] H. J. Kushner, "Analysis of controlled multiplexing systems via numerical stochastic control methods," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 1207-1218, vol. 13, Sept., 1995.
- [6] L. Benmohamed, S. M. Meerkov. "Feedback control of congestion in packet switching networks: the case of a single congested node," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 1, pp. 693 - 708, Dec., 1993.
- [7] A. Kolarov, G. Ramamurthy, "A control-theoretic approach to the design of an explicit rate controller for ABR service," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 7, no. 5, pp. 741 -753, Oct., 1999.
- [8] A. Kolarov, G. Ramamurthy, "A control-theoretic approach to the design of closed loop rate based flow control for high speed ATM networks," *Proc. of Infocom '97*, pp. 293-301, 1997.
- [9] D. Gaiti, Boukhatem, "Cooperative congestion control schemes in ATM network," *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-110, vol. 34, Nov., 1996.
- [10] Yongdong Zhao, San-Qi Li, "Feedback control of multiloop ABR traffic in presence of CBR/ABR traffic transmission," *IEEE International Conference on Communications '96*, pp. 1717-1721, 1996.
- [11] S. Mascolo, D. Cavendish, M. Gerla, "ATM rate based congestion control using a Smith predictor: an EPRCA implementation," *Proc. of INFOCOM '96*, pp. 569-576, March, 1996.
- [12] S. Mascolo, M. Gerla, "Classical control approach to congestion avoidance in ATM high speed networks." *Proceedings of the IEEE ATM'97 Workshop*, pp. 361-367, 1997.
- [13] C. Kwan, R. Xu, L. Haynes, C. Chou, and E. Geraniotis, "Fast flow control in high-speed communication networks," *IEEE CDC 98*, pp. 2139-2140, 1998.
- [14] B. G. Kim, J. S. Ma, "Theoretic framework of network feedback control with long delays," *Proceedings on Computer Communications and Networks*, pp. 463 - 468, Oct., 1999
- [15] D. R. Vaman, Xuedao Gu, S. Kumar, Xiaomei Qian, and T. M. Oser, "A flow control strategy for ATM networks based on a unified performance parameter," *GLOBECOM '93*, pp. 1822 - 1826, vol. 3, 1993.
- [16] B. K. Kim and C. Thompson, "Optimal feedback control of ABR traffic in ATM networks," *Proc. IEEE GLOBECOM '98*, pp. 844-848, 1998.
- [17] B. K. Kim, C. Thompson, "ABR traffic control in ATM networks using optimal control theory", *IEEE International Conference on ATM*, pp. 327 -333, 1998.
- [18] O. C. Imer, T. Basar, "Optimal solution to a team problem with information delays : An application in flow control for communication networks", *Proc. of conference on decision and control*, vol. 3, pp. 2697-2702, 1999.
- [19] E. Altman, T. Basar, "Optimal rate control for high speed telecommunication networks," *Proc. of CDC*, pp. 1389-1394, vol. 2, 1995.
- [20] H. Zhang, O. W. Yang, "Design of robust congestion controllers for ATM networks," *Proc. IEEE INFOCOM '97*, pp. 302-309, April, 1997.
- [21] C. E. Rohrs, R. A. Berry, S. J. O'Halek, "A control engineer's look at ATM congestion avoidance," *GLOBECOM '95*, pp. 1089 - 1094, 1995.
- [22] C. E. Rohrs, R. A. Berry, "A linear control approach to explicit rate feedback in ATM networks," *Proc. IEEE INFOCOM '97*, pp. 293-301, April, 1997.
- [23] R. Izmailov, "Adaptive feedback control algorithms for large data transfers in high-speed networks," *IEEE Transactions on Automatic Control*, pp. 1469 -1471, vol. 40, Aug., 1995.
- [24] Chung-Ju Chang, Ray-Guang Cheng, "Traffic control in an ATM network using fuzzy set theory," *INFOCOM '94*, pp. 1200 - 1207, vol. 3, June, 1994.
- [25] C. Kwan, R. Xu, L. Haynes, C. Chou, and E. Geraniotis, "Fast flow control in high-speed communication networks," *IEEE CDC 98*, pp. 2139 -2140, 1998.
- [26] Narvaez, P., Kai-Yeung Siu, "Optimal feedback control for ABR service in ATM," *Proceedings on Network Protocols '97*, pp. xi+309, 1997.
- [27] S. Keshav, "A control-theoretic approach to flow control." *Proc. ACM SIGCOMM '91*, pp. 3-15, Sept., 1991.
- [28] E. Altman, T. Basar, R. Spikant, "Multi-user rate-based flow control with action delays: A Team-Theoretic Approach," *IEEE CDC '97*, pp. 2387-2392, 1997.
- [29] Congestion avoidance and control, *Proc. ACM SIGCOMM '88*, pp. 314-329.
- [30] Berkeley TCP evolution from 4.3-tahoe to 4.3-reno,

- Proc. of the 18th internet Engineering Task Force*
- [31] S. Mascolo, "Classical control theory for congestion avoidance in high-speed Internet", *IEEE CDC '99*, pp. 2709-2714, 1999.
- [32] S. Mascolo, "Smith's predictor for congestion control in TCP internet protocol," *ACC '99*, pp. 4441-4445, 1999.
- [33] H. Ohsaki, M. Murata, T. Ushio, H. Miyahara, "A control theoretical approach to a window-based flow control mechanism with explicit congestion notification", *IEEE CDC '99*, pp. 2715-2720, 1999.
- [34] H. Ohsaki, M. Murata, T. Ushio, H. Miyahara, "Stability analysis of window-based flow control mechanism in TCP/IP networks," *Proc. of IEEE conference on control applications*, pp. 1603-1606, 1999.
- [35] G. Hasegawa, M. Murata, H. Miyahara, "Fairness and stability of congestion control mechanisms of TCP," *INFOCOM '99*, pp. 1329-1336, vol. 3, March, 1999.
- [36] U. Madhow, "Dynamic congestion control and error recovery over a heterogeneous internet," *CDC '97*, pp. 2368-2374, 1997.
- [37] S. Arnyavisitakul, L. F. Chang, "Signal and interference statistics of a CDMA system with feedback power control," *IEEE trans. on communications*, vol. 41, no. 11, pp.1626-1634, Nov., 1993.
- [38] J. M. Rulnick, N. Bambos, "Power control and time division: The CDMA versus TDMA question," *IEEE INFOCOM*, pp. 634-641, 1997.
- [39] F. Gunnmarsson, J. Blom, F. Gustafsson, "Power control algorithms and stability analysis for radio network control," *IEEE CDC '98*, pp. 2041-2042, 1998.
- [40] M. L. Sim, E. Gunawan, C. B. Soh and B. H. Soong, "Study on the characteristics of predictive closed-loop power control algorithms for a cellular DS/CDMA system," *Proc. of ICUPC '98*, vol. 2, pp. 981-985, 1998.
- [41] Q. Shen, W. A. Krzymien, "Performance improvement of closed loop power control in CDMA cellular mobile communication systems," *Proc. of Vehicular Technology Conference*, pp. 56-60, 1996.
- [42] J. M. A. Tanskanen, A. Huang, T. I. Laakso, S. J. Ovaska, "Prediction of received signal power in CDMA cellular systems," *Proc. of Vehicular Technology Conference*, pp. 922-926, 1995.
- [43] J. M. A. Tanskanen, J. Mattila, M. Hall, T. Korhonen, S. J. Ovaska, "Predictive closed loop power control for mobile CDMA systems," *Proc. of Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 934-938, 1997.
- [44] Kin K. Leung, "Kalman-filter method for power control in broadband wireless networks," *INFO-COMM*, pp. 948-956, 1999.
- [45] Po-Rong Chang, Bor-Chin Wang, "Adaptive fuzzy proportional integral power control for a cellular CDMA system with time delay," *IEEE J. on selected areas in comm.*, vol. 14, pp. 1818-1829, Dec., 1996.
- [46] C. C. Wu, D. P. Bersekas, "Distributed power control algorithms for wireless networks," *CDC 99*, pp. 3556-3561, 1999.
- [47] L. Song, J. M. Holtzman, "CDMA dynamic downlink power control," *IEEE Proc. of Vehicular Technology Conference*, pp. 1101 -1105, 1998.



권 옥 현

1966년 서울대 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1972), 미국 Brown University 제어공학박사(1975). 1976년~1977년 University of Iowa 겸직교수. 1981년~1982년 Stanford University 객원교수, 1977년~현재 서울대학교 전기공학부 교수, 1991~ 현재 제어계측신기술연구센터 소장, 관심분야는 제어 및 시스템 이론, 이산현상 시스템, 산업용 통신망, 분산 공정 제어 등



김 형 석

1996년 서울대 전기공학부 졸업. 동대학원 석사(1998), 1993년~현재 동대학 박사과정 재학 중. 관심분야는 통신망 시스템 설계, 제어 및 시스템 이론, 실시간 시스템 설계.